

0- 793223

На правах рукописи



Хайрулин Ринат Сайярович

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И
СИНТЕЗА ЭВАКУАЦИОННЫХ ПЛАНОВ КРУПНЫХ ГОРОДОВ

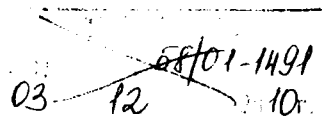
специальность 08.00.13 –

Математические и инструментальные
методы экономики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Москва 2010



Работа выполнена на кафедре Математических методов в экономике ГОУ
ВПО «Российская экономическая академия имени Г.В. Плеханова».

Научный руководитель

д. т. н.

Косоруков Олег Анатольевич

Официальные оппоненты

д. э. н., профессор

Капитаненко Валерий Владимирович

к.ф.-м.н.

Белов Андрей Григорьевич

Ведущая организация

Академия Государственной
Противопожарной Службы МЧС России

Защита диссертации состоится 23 декабря 2010г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.196.01 в ГОУ ВПО «Российская экономическая академия имени Г.В. Плеханова» по адресу: 115998, г. Москва, ул. Стремянный переулок, д. 36, корпус 3, ауд. 353.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РЭА имени Г.В. Плеханова

Автореферат разослан «14» ноября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.196.01

доктор технических наук, профессор



Л.Ф. Петров

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



0000801674

Список обозначений

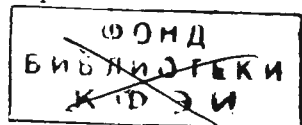
ПП - площадки посадки,
ПЭП - приемные эвакуационные пункты,
ТС – эвакуационные транспортные средства,
СЭП – сборные эвакуационные пункты,
ЧС – чрезвычайная ситуация.

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Возрастающие риски отказов технических систем жизнеобеспечения, увеличившееся в последнее время количество природных катаклизмов и локальных военных конфликтов, сопровождаемых пожарами, взрывами, затоплениями и другими негативными последствиями, наносят обществу существенный материальный и социальный ущерб.

В частности в РФ средний годовой рост социальных и экономических потерь от природных и техногенных ЧС за последние 30 лет составил: по числу погибших – 4%, пострадавших – 8% и материальному ущербу – 10%. Средний уровень индивидуального риска для населения России существенно превышает допустимый уровень, принятый в развитых странах мира. В подобной ситуации переход к устойчивому развитию становится нереальным без резкого повышения уровня эффективности предупредительных мер, уменьшающих опасность, масштабы и последствия ЧС, разработка которых становится одной из важнейших задач обеспечения безопасности России. На это обращено внимание и в федеральной целевой программе «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации», где в качестве одного из основных направлений выделено создание и развитие научно-методических основ управления рисками возникновения чрезвычайных ситуаций.

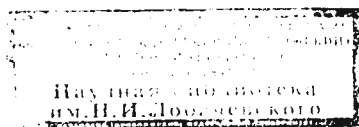


Одним из основных способов защиты населения от современных средств поражения в военное время, а также в случаях возникновения масштабных чрезвычайных ситуаций техногенного или природного характера является его эвакуация и размещение в заблаговременно подготовленных безопасных районах вне зон действия поражающих факторов источников ЧС. Особенно эффективен этот способ в местах массового скопления населения и, в первую очередь в крупных городах.

Вместе с тем планирование эвакуации населения является весьма трудоемким процессом вследствие объективных особенностей формализации условий ее проведения, учета имеющихся ресурсов и неоднозначных возможностей их использования. В такой ситуации для разработки планов и управления процессом эвакуации целесообразно использовать адекватные рассматриваемым процессам математические методы и модели, позволяющие провести количественную оценку как характеристик самого процесса эвакуации, так и связанных с ним издержек, выработать эффективные управленческие решения, характеризующиеся оптимальными значениями принятых в обществе критериев по минимизации издержек, затрат, времени эвакуации, потерь населения и т.п. с учетом имеющихся ресурсов. Актуальность подобных разработок многократно возрастает в условиях увеличения численности населения и объемов материальных ценностей в городах, сложности и многопрофильности их структур, повышения требований к оперативности управленческих решений и их многокритериальности.

Степень научной разработанности проблемы

С точки зрения математического моделирования разработка эффективных эвакуационных планов в научной литературе обычно рассматривается как сетевая задача транспортного типа большой размерности в многополюсной сети с неопределенными факторами и ограниченными ресурсами. Большой вклад в теорию и практику постановки и решения сетевых задач управления безопасностью в условиях неопределенности внесли Давыдов Э.Г., Разумихин Б.С., Зло-



бина С.В., Берзин Е.А., Малашенко Е.Ю., Моисеев Н.Н., Фуругян М.Г., Прилуцкий М. Х., Брушлинский Н.Н., Топольский Н.Г., Цурков В.И. и др.

Вместе с тем ряд вопросов, относящихся к данной области, до сих пор остается нерешенным, либо решенным не в полной мере. В частности, недостаточное внимание уделялось проблеме формализации городской среды, как распределенной транспортной подсистемы. Также практически не рассматривалась задача эффективного распределения эвакуационных ресурсов с учетом рисков и ограничений по уровню безопасности населения и окружающей среды в условиях крупного города. Недостаточное внимание уделялось и критериям таких задач, учитывающим как экономическую, так и социальную составляющую процесса эвакуации в городских системах, нелинейный характер взаимосвязей между рассматриваемыми параметрами.

Для решения потоковых сетевых задач разработано достаточно большое количество методов и алгоритмов, однако все еще не разработаны эффективные алгоритмы для решения некоторых классов нелинейных оптимизационных задач синтеза сетевых структур при наличии неопределенных факторов, к которым сводятся постановки некоторых вариантов задач планирования и управления эвакуацией.

Нерешенность этих проблем и вопросов и предопределили цели и задачи данного диссертационного исследования.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке математических моделей и методов решения задач анализа и синтеза эвакуационных планов крупных городов в условиях неопределенности кризисной ситуации, параметров городской среды, ограничений по эвакуационным ресурсам и уровням рисков для населения и проблемно-ориентированного программного обеспечения управления процессами эвакуации в крупных городах.

Реализация поставленной цели обусловила необходимость решения ряда конкретных задач:

- разработать формализованное описание плана эвакуации в крупном городе;

- formalizovat postanovki zadach optimal'nogo sinteza kommunikatsionnykh setey s vremennymi parametrami potokov i vyavity ih osobennosti s tochi zreniya vozmozhnykh metodov resheniya;

- obosnovat kriterii effektivnosti planov evakuatsii v usloviyakh neopredelennosti ee sredy;

- razrabotat matematicheskie modeli dlya optimizatsii evakuatsionnykh planov v krupnykh gorodov s kriteriyami na minimizatsiyu zatrat i vremeni provedeniya evakuatsii pri neopredelennosti ee usloviy;

- razrabotat effektivnye algoritmy dlya resheniya razlichnykh klassov nelineynykh optimizatsionnykh zadach sinteza kommunikatsionnykh setey pri nalichii neopredelennykh faktorov;

- razrabotat metody resheniya setevykh zadach transportnogo tipa bolshoy razmernosti s neopredelennymi faktormi na osnove sovmestnogo ispol'zovaniya metoda dekompozitsii Dandiga-Vulfa i algoritmov teorii grafov;

- razrabotat i programmno realizovat problemno-orientirovannuyu sistemu upravleniya evakuatsiyey krupnykh gorodov na osnove optimizatsionnoy matematicheskoy modeli s kriteriyem na minimum vremeni evakuatsii.

Объект и предмет исследования

V kachestve obekta issledovaniya rassmatrivayutsya transportnye struktury krupnykh gorodov v krizisnykh situatsiyakh, predpolagayushchikh provedeniye evakuatsii naseleniya i materialnykh tsennostey.

Predmetom issledovaniya yavlyayutsya matematicheskie modeli i metody analiza i sinteza evakuatsionnykh planov krupnykh gorodov v krizisnykh situatsiyakh.

Teoreticheskoy i metodologicheskoy osnovoy issledovaniya posluzhili trudy otechestvennykh i zarubezhnykh spetsialistov po problemam obespecheniya bezopasnosti, upravleniya riskami, setevogo planirovaniya. V rabote ispol'zovались методы системного анализа, принятия решений, линейной алгебры, теории оптимизации, теории двойственности, теории графов, теории вероятностей

и математической статистики, потокового программирования, методы декомпозиции, имитационного моделирования, методы сеточной аппроксимации.

Информационную основу исследования составили справочные и статистические материалы, отражающие нормативные оценки, расчетные и экспериментальные данные о скорости движения транспортных потоков при различных состояниях транспортной сети, оценки стоимости мероприятий по защите населения в период проведения эвакуации, временные нормативы и параметры проведения эвакуации, а также вероятностные оценки индивидуального риска для населения в кризисных ситуациях.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в разработке комплекса имитационных и оптимизационных моделей и методов сетевого планирования эвакуационных мероприятий в крупных городах при неопределенности их условий с нелинейными критериями и ограничениями по уровню безопасности и имеющимся ресурсам и алгоритмов анализа и синтеза коммуникационных сетей большой размерности, позволяющих оптимизировать маршруты, объемы перевозок и распределение транспортных средств для эвакуационных колонн.

Наиболее существенные результаты исследования, полученные лично автором и выдвигаемые на защиту, состоят в следующем:

- разработан подход к формализации процесса эвакуации населения и материальных ценностей в крупных городах в кризисных ситуациях на основе его представления в виде транспортной ориентированной сети (сборные эвакуационные пункты, пункты посадки, городские транспортные коммуникации, приемные эвакуационные пункты) в условиях неопределенности ее структуры и параметров;

- обоснованы целесообразные варианты критериев качества процесса эвакуации, характеризующие стремление к минимизации времени эвакуации и задействованных в этом процессе ресурсов;

- разработаны варианты постановок задач оптимизации эвакуации в крупных городах, как транспортных потоков в многополосных коммуникационных сетях с нелинейными критериями эффективности;

- созданы и обоснованы новые эффективные алгоритмы решения:

- нелинейных задач синтеза коммуникационных сетей при наличии неопределенных факторов, основанные на использовании полиномиальных функций, описывающих скоростные параметры потоков в зависимости от его плотности;
- задач транспортного типа большой размерности с неопределенными факторами на основе метода декомпозиции Данцига-Вульфа;
- задач синтеза коммуникационных сетей при наличии неопределенных факторов, базирующиеся на нахождении максимального потока и минимального разреза, а также построении покрывающего леса;

- разработан алгоритм оптимального распределения транспортных ресурсов в коммуникационной сети с временными параметрами потоков, базирующийся на представлении потока в терминах дуги-цепи;

- разработано программное обеспечение для реализации математической модели оценки временных параметров эвакуационных планов крупных городов на языке Visual Basic;

- разработана программная реализация на языке Visual Basic системы управления эвакуацией крупных городов на основе оптимизационной математической модели с критерием на минимум времени реализации этого процесса.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии теории и совершенствовании методов решения задач разработки, анализа и синтеза эвакуационных планов в крупных городах как задач сетевого планирования большой размерности с нелинейными критериями, характеризующихся высокой степенью неопределенности исходных данных.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования представленных моделей и методов при разработке эффективных планов эвакуации в крупных городах путем оптимизации маршрутов, объ-

емов перевозок и распределения транспортных ресурсов, а также оценить влияние отдельных параметров на временные характеристики эвакуации.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на научных семинарах кафедры математических методов в экономике РЭА им. Г.В. Плеханова, научных семинарах учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, на Международных Плехановских чтениях (Москва, 2010), на Международной научно-практической конференции «Современная экономика: концепции и модели инновационного развития» (13 мая 2010 г., Москва).

Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Теоретические основы автоматизированных СИПР по эвакуации из крупных городов», проводимой в Академии Государственной противопожарной службы.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 работ общим объемом 3,4 п.л., из них авторских 2,5 п.л. в том числе 3 работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, зарегистрирован 1 программный продукт в Фонде ВНИИЦ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 192 страницах и включает 5 таблиц, 16 рисунков и 4 приложения. Список литературы включает 196 источников.

II. Основное содержание работы

1. В работе представлено содержание процесса эвакуации населения крупного города при чрезвычайных ситуациях, угрожающих жизни и здоровью людей, способных нанести значительный материальный ущерб. Согласно нормативным документам, эвакуация как способ защиты населения является процессом, в ходе которого население организовано вывозится и выводится всеми видами

имеющего транспорта и пешим порядком из города и размещается в безопасной зоне.

Процесс эвакуации включает в себя следующие этапы:

- сбор эвакуанселения;
- регистрация населения и посадка его на транспорт либо формирование пеших колонн;
- прибытие транспорта к пунктам посадки и формирование транспортных колонн для отправки;
- движение транспорта и пеших колон по маршрутам в пределах города и за городом;
- прибытие транспорта с эвакуанселением и пеших колонн в безопасные районы;
- высадка эвакуанселения и возвращение транспорта в город;
- прибытие транспорта на пункты посадки, загрузка и последующая отправка в районы безопасного размещения.

Описанный выше процесс считается законченным при выходе последней колонны (транспортного средства) за зону возможно слабых разрушений. Планирование эвакуации предполагает формирование системы маршрутов (синтез маршрутов) и распределение по маршрутам транспортных средств. При этом обычно стремятся минимизировать время эвакуации, что связано с минимизацией рисков. Под временем эвакуации понимают продолжительность периода от начала перевозки людей время с площадок посадки до полного их перемещения на приемные эвакуационные пункты.

В работе представлена формализация процесса эвакуации с учетом следующих допущений:

1. Транспортные средства предполагаются однородными. В основном используется автомобильный транспорт. Другие виды транспорта в условиях города для эвакуации являются малоэффективными (в частности речной, авиационный).
2. Метрополитен рассматривается как внутригородской транспорт, который

осуществляет доставку эвакуируемого населения к СЭП.

3. Автотранспортные средства осуществляют перевозку по предписанным маршрутам циклическим образом, то есть, произведя выгрузку, они вновь возвращаются к месту загрузки тем же маршрутом и снова загружаются, т.е. дуги сети предполагаются двунаправленными.
4. После окончания работы на маршруте транспортные средства не перераспределяются на другие маршруты.
5. Рассматриваются две системы коммуникаций: сеть улиц и автомобильных магистралей города и железнодорожная сеть.
6. Коммуникационная сеть автотранспорта представляет собой систему улиц и автомагистралей города с иерархией, характеризующей их значимость в транспортной сети, в соответствии с которой некоторые дуги коммуникационной сети улиц допустимы для прохождения только пешеходных колонн.
7. Движение пешеходных колонн по участкам автодорог происходит по пешеходной части или по обочине, не создавая тем самым помех для движения транспортных колонн.
8. Эвакуируемое население прибывает формируется в колонны трех типов – пешеходные, для погрузки в автотранспорт (автотранспортная колонна) или для погрузки в железнодорожный транспорт.
9. Колонны могут менять свой тип на маршруте эвакуации, например, пешеходная колонна прибывает на вокзал (станцию) и загружается в железнодорожный транспорт, следуя далее как железнодорожная колонна.
10. Промежуточные ПП при комбинированном способе эвакуации располагаются за зоной возможных слабых разрушений.
11. Эвакуируемое население самостоятельно или в составе пешеходных колонн прибывает на приписанные к СЭПу ПП, а далее организованными группами прибывает на ПП.
12. Время загрузки и выгрузки каждого типа ТС известно.
13. Эвакуация населения в рамках одного ПП происходит последовательно

по ПЭП.

В работе отмечено, что выбор режима эвакуации и принятие управленческих решений определяется состоянием внешней среды, а также параметрами, характеризующими население и имеющиеся транспортные ресурсы, под которыми понимаются:

- метеорологические условия (осадки, туман, гололед);
- астрономические условия (учет времени года и времени суток);
- параметры ПП (расположение, привязка к СЭП, ожидаемая численность, прогнозируемые параметры плотности входного потока);
- структура коммуникационной сети (архитектура, топология и параметры пропускных способностей);
- параметры ПЭП (порядок вывода, численность эвакуируемых);
- параметры управления ТС (распределение по колоннам, распределение колонн по ПП, маршруты движения колонн);
- организационные параметры (время посадки колонны, время высадки, временной интервал между подачами колонн).

С учетом этого процесс эвакуации в работе представлен в виде модели транспортной сети, включающей сеть городских улиц, а также дорог и магистралей, выводящих в загородную зону, как автомобильных, так и железнодорожных. Данная сеть представляется ориентированным графом, то есть набором вершин и направленных дуг. Улицы с двусторонним движением представляются в сети парой дуг противоположного направления. Вершины сети предполагаются трех типов. Тип 1 – ПП, то есть места формирования, загрузки и отправления транспортных колонн. Тип 2 – промежуточные вершины, то есть места ответвления или пересечения улиц и магистралей. Тип 3 – места высадки эвакуируемых на ПЭП, находящихся в безопасной зоне.

Каждая дуга характеризуется длиной и набором некоторых свойств (количество полос, качество покрытия и т.д.). Для удобства реализации рассматриваемые свойства (кроме количества полос) агрегируются в понятие «категория дороги», которое определяет среднюю скорость транспортных средств на дан-

ной дуге в зависимости от плотности загрузки дуги (количество автотранспортных средств на единицу длины). Данная зависимость предполагается известной.

Для каждой вершины типа 1 известно количество эвакуируемых из данной вершины. Вершины типа 2 являются транзитными, то есть разность входящего и исходящего потоков в них равна 0. Для каждой вершины типа 3 известно предельно допустимое количество эвакуируемых, которые могут быть доставлены на данную площадку (емкость площадки).

Вместе с тем в работе отмечено, что ряд особенностей процесса эвакуации отличаю данную модель от традиционных моделей транспортного типа:

- наличие нелинейных зависимостей пропускной способности коммуникационных дуг от интенсивности самих потоков;
- сочетание разнородных транспортных коммуникаций (автомобильные, железнодорожные, пешие);
- существование рисков блокировки отдельных коммуникаций;
- большое количество неопределенных факторов, характеризующих состояние внешней среды.

2. В работе отмечено, что планирование и управление эвакуацией базируется на использовании определенных критериев качества этого процесса. При этом базовыми из них являются:

- Минимизация времени эвакуации, с учетом того, что время может рассматриваться как мера риска возможных санитарных потерь, связанных с временем пребывания в зоне воздействия поражающих факторов ЧС. Например, при чрезвычайных ситуациях, сопровождающихся радиоактивным загрязнением территории уровень риска оценивается как вероятность онкологического заболевания индивидуума, зависящей от уровня поглощенной (или эффективной) дозы облучения. В свою очередь, величина этой дозы пропорциональна времени облучения.
- Минимизация ожидаемого материального ущерба.
- Минимизация общего объема задействованного транспортного ресурса.

При этом в работе обосновано, что данные критерии находятся в определенном противоречии, поскольку, например, сокращение выделенных на эвакуацию ресурсов ведет к увеличению продолжительности процесса эвакуации и соответственно к росту рисков чрезвычайной ситуации. В этой связи в работе рассматривается возможность формирования векторных показателей качества процесса эвакуации, характеризующихся сочетанием нескольких критериев.

3. На основе формализации процесса эвакуации с учетом его возможных критериев качества в работе сформулирован ряд задач, в том числе:

А) Анализ временных показателей эвакуационного плана в зависимости от внешних факторов: времен года и погодных условий (дождь, снег, гололед, туман и т.д.); различной степени загруженности улиц и магистралей неэвакуационным транспортом; общего количества и характеристик, выделенных транспортных ресурсов; характеристик транспортных средств; динамики интенсивности прибытия населения на различные пункты посадки; количества населения, прибывающего на пункты посадки; емкости площадок выгрузки.

Б) Формирование обоснованных эвакуационных планов, включая: формирование системы пунктов посадки, характеризующимися координатами местонахождения и количеством приписанных; формирование системы приемных эвакуационных площадок с координатами их местонахождения и количеством приписанных; формирование системы маршрутов колонн; распределение транспортных средств по маршрутам; распределение численностей эвакуируемых по маршрутам.

В) Реализация оперативного управления процессом эвакуации в реальном времени: отображение состояния процесса на определенное время от начала эвакуации; оперативное перераспределение транспортных средств между пунктами посадки и маршрутами; оперативное изменение маршрутов эвакуационных колонн в случае затруднений движения или иных нештатных ситуаций.

Г) Оценка вероятностей нарушения временных нормативов процесса эвакуации при наличии внешних случайных факторов: погодные условия; поломки авто-

транспортных средств; динамика изменения интенсивностей прибытия населения на пункты посадки; степень загруженности улиц и магистралей неэвакуационным транспортом.

4. В работе процесс эвакуации представлен как поток на коммуникационной сети, в которой в отличие от классических ее вариантов интенсивность потоков на коммуникационных дугах зависит от их плотности и определяется выражением (1), где p_j – плотность потока, $V_j(p_j)$ – скорость потока по дуге j .

$$y_j = V_j(p_j) p_j. \quad (1)$$

Типичным видом зависимостей $V(p)$ являются функции S-образной формы (рис. 1).

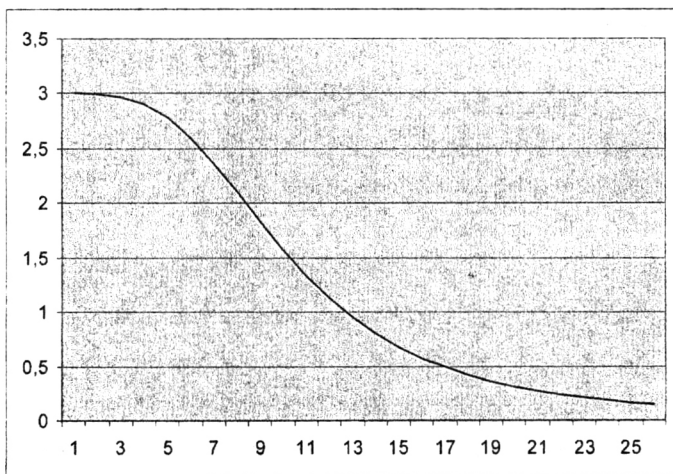


Рис. 1. Пример зависимости S-образной формы

В работе представлена формализация задачи определения оптимальных интенсивностей потоков на дугах коммуникационной сети с критерием на минимум времени проведения эвакуации (см. 2).

$$\begin{aligned}
& \min_{y,t} t & (2) \\
& \frac{c_k}{W \cdot \sum_{j \in C(k)} y_j} \leq t, \quad k \in I_1 \\
& \frac{d_k}{W \cdot \sum_{j \in D(k)} y_j} \geq t, \quad k \in I_2 \\
& \sum_{j \in C(k)} y_j - \sum_{j \in D(k)} y_j = 0, \quad k \in I_3 \\
& 0 \leq y_j \leq y_j^{\max}
\end{aligned}$$

где t – время перевозки, $C(k)$ – множество индексов дуг, входящих в вершину k , $D(k)$ – множество индексов дуг, исходящих из вершины k , y_j – интенсивность потока по дуге j , y_j^{\max} – максимальная интенсивность потока, I_1 – множество пунктов вывоза, I_2 – множество пунктов ввоза, I_3 – множество промежуточных пунктов транспортной сети, c_k – необходимый объем вывоза в k -м пункте вывоза, d_k – необходимый объем ввоза в k -м пункте ввоза, W – усредненная емкость одного транспортного средства.

5. В диссертации разработан алгоритм оптимального распределения транспортных ресурсов для задач типа (2) при заданной системе маршрутов эвакуационных транспортных колонн. Основными его этапами являются:

- оценка оптимальных значений плотностей потока на дугах, путем решения системы нелинейных уравнений вида $y_j = V_j(p_j)p_j$ при найденных в ходе решения задачи (2) значениях вектора y ;
- расчет объема транспортных ресурсов, задействованных на дугах сети $x_j = p_j l_j$, где l_j – протяженность j -й дуги;
- проверка условия достаточности транспортных ресурсов (3)

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq R \quad (3)$$

где R – общее количество имеющихся транспортных ресурсов. Если неравенство (3) выполняется, то распределение транспортных ресурсов по системе маршрутов производится на основе соотношений (4):

$$\begin{aligned} y_j &= \sum_{i: j \in N_i} h(N_i) \\ p_j^i &= \frac{h(N_i)}{V_j(p_j)} = \frac{x_j'}{l_j} \\ x_j' &= \frac{h(N_i) \cdot l_j}{V_j(p_j)} \\ \sum_{i: j \in N_i} x_j' &= \frac{l_j}{V_j(p_j)} \sum_{i: j \in N_i} h(N_i) = \frac{l_j \cdot y_j}{V_j(p_j)} = x_j \\ X_i &= \sum_{j \in N_i} x_j' \end{aligned} \quad (4)$$

где N_i – множество дуг, входящий в i -й маршрут, $h(N_i)$ – интенсивность потока по i -у маршруту, p_j^i – плотность на дуге j , создаваемая маршрутом i , X_i – транспортный ресурс, выделенный на маршрут i ;

- решение задачи (2) с дополнительными ограничениями (5) в случае, если неравенство (3) не выполняется:

$$y_j = V_j \left(\frac{x_j}{l_j} \right) \frac{x_j}{l_j}, \quad \sum_{i=1}^m x_j \leq R \quad (5)$$

- формирование распределения транспортных ресурсов по системе маршрутов на основе соотношений (4).

6. Для решения задач групп А) и Г) - анализ временных показателей эвакуационного плана в зависимости от внешних факторов и оценки вероятностей соблюдения временных нормативов процесса эвакуации при наличии внешних случайных факторов в работе была построена динамическая модель движения эвакуационного транспорта в составе транспортных колонн и разработан алгоритм ее реализации. Данная модель имитирует движение транспортных колонн с учетом возникающих плотностей потоков и состояния внешних факторов. Общая схема этого алгоритма представлена на рис. 2.

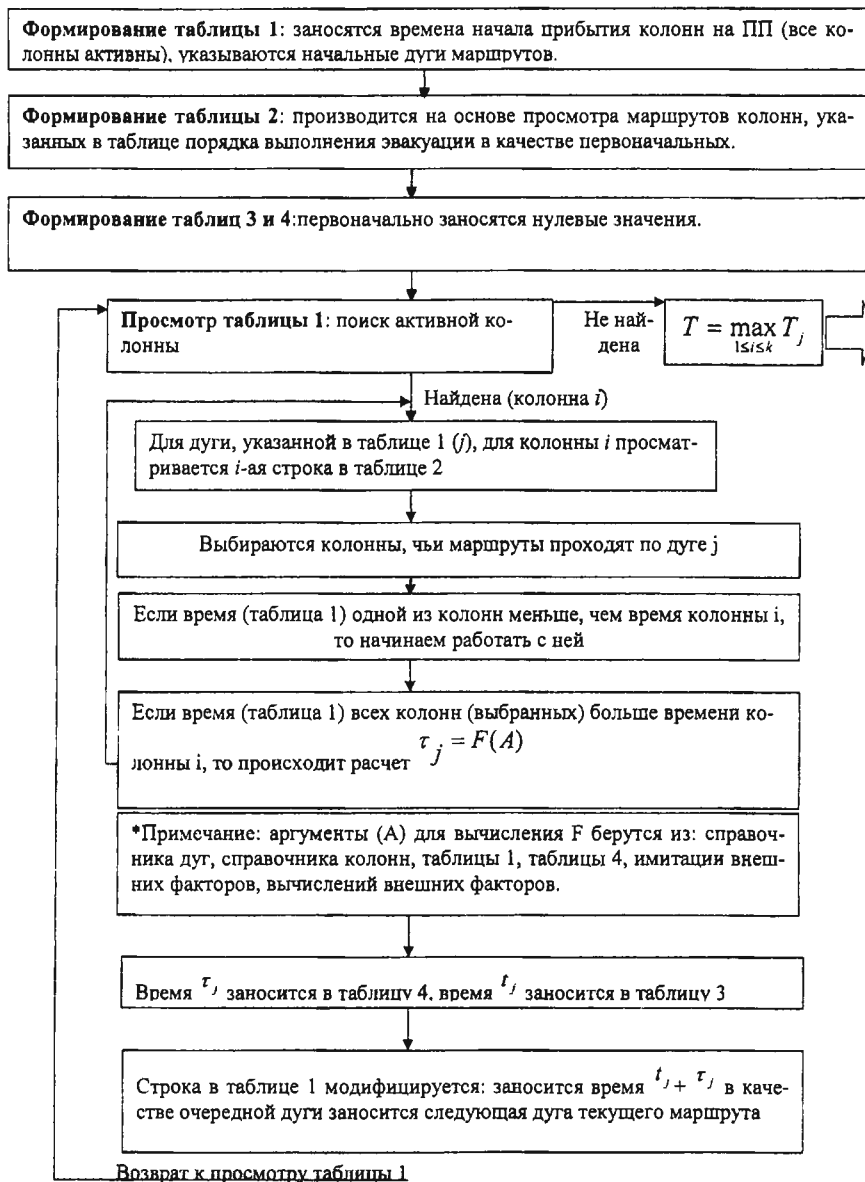


Рис. 2. Схема алгоритма динамического моделирования движения колонн

В работе отмечено, что ряд внешних факторов динамической модели движения эвакуационного транспорта целесообразно рассматривать как случайные величины, функции распределения которых известны или их можно оценить. Исходные данные в этом случае могут быть сформированы с использованием методов имитационного моделирования.

В частности, для оценки количества людей, прибывающих на пункты посадки за определенное время, в работе использовались PERT - распределения. Количество пришедших на пункт посадки за некоторый период времени $[t_1, t_2]$, вычисляется как определенный интеграл от функции интенсивности:

$$P_i(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \lambda_i(t) dt \quad (6)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность входного потока на i -м пункте посадки в момент времени t . В работе обосновано, что функция $\lambda_i(t)$ может быть хорошо приближена PERT-распределениями, задаваемыми тремя параметрами a , b и c , которые являются связанными, так как общее количество пришедших на каждый пункт посадки предполагается известным (рис. 3).

В таком случае можно считать случайными величинами только параметры a и b , например: ξ_a и ξ_b - две зависимые (положительная корреляция) нормально распределенные случайные величины с параметрами μ_a , σ_a и μ_b , σ_b .

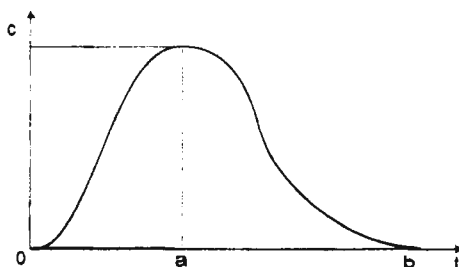


Рис. 3. Общий вид функции интенсивности входного потока

Для получения решений в динамической модели движения эвакуационного транспорта с имитацией интенсивностей прибытия населения на пункты по-

сделки использовалась программа RISKOptimizer.

8. Для решения задач групп Б) и В), в результате решения которых формируются обоснованные эвакуационные планы и реализуется оперативное управление процессом эвакуации в реальном времени, разработана математическая модель, осуществляющая оптимальный синтез маршрутной сети эвакуационных колонн, оптимальное распределение эвакуируемых по площадкам эвакуации, оптимизацию распределения транспортных ресурсов с учетом ряда внешних факторов в процессе эвакуации. В качестве критерия в модели рассматривался минимум времени проведения эвакуации.

Модель учитывает разнородность маршрутных сетей, в зависимости от вида эвакуации (в составе автоколонн, пеших колонн, железнодорожным и речным транспортом). В частности, при выборе маршрутов имеется возможность «закрытия» отдельных участков маршрута и нахождения путей объездов.

Система, может эксплуатироваться как автономно, так и в сочетании с геоинформационными системами, что существенно расширяет сферу ее использования.

Базовый вариант модели для задач групп Б) и В) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \min \quad Z \\ & \quad X, A, Z \end{aligned} \quad (7)$$

$$2\left(IS\left(\frac{l_1}{F_1\left(\left(\left(\frac{X_1}{(IS)_1} \right), \dots, \left(\frac{X_N}{(IS)_N} \right) \right) IS \right)_1}, \dots, \frac{l_1}{F_m\left(\left(\left(\frac{X_1}{(IS)_1} \right), \dots, \left(\frac{X_N}{(IS)_N} \right) \right) IS \right)_m} \right) \right), K_r \leq Z,$$

$$1 \leq r \leq N, X_1 + \dots + X_N \leq R,$$

$$K_r = \begin{cases} \frac{a_r}{X_r W}, & a_r > 0, X_r > 0, \\ 0, & a_r = 0, \quad \text{или} \quad X_r = 0, \end{cases}$$

$$(IN(A IS))_k \geq c_k, k \in I_1,$$

$$(IN(A IS))_k \leq d_k, k \in I_3,$$

$$X, A \geq 0.$$

Z – вспомогательная переменная; n – количество вершин в сети; m – количество дуг в сети; N – количество маршрутов в сети; X_r – количество транспортных средств, выделенных на маршрут r ; R – общее количество распределяемых автотранспортных средств; W – количество эвакуируемых, перевозимых транспортным средством; l_j – длина j -ой дуги; L_r – протяженность r -го маршрута; a_r – количество эвакуируемых по маршруту r ; p_r – плотность потока на маршруте r ($p_r = \frac{X_r}{L_r}$); IS – матрица инцидентности маршрутов, размерности $N \times m$, показывает, какие дуги входят в маршруты, а именно $IS_{rj} = 1$, если дуга j принадлежит маршруту r и $IS_{rj} = 0$ иначе, под маршрутом понимаем некоторую последовательность сонаправленных дуг, начинающихся в одной из вершин типа 1 и заканчивающихся в одной из вершин множества 3; IN – матрица инцидентности графа сети, размерности $p \times m$, показывает структуру сети, а именно в какой вершине начинается каждая дуга и в какой заканчивается, $IN_{ij} = 1$, если дуга j начинается или заканчивается в вершине i и $IN_{ij} = 0$ иначе; $((P IS)_1, \dots, (P IS)_m)$ – вектор плотностей потока на дугах; v_j – средняя скорость движения автотранспортных средств по дуге j ; $v_j = F_j((P IS)_j)$; t_j – время прохождения дуги j транспортным средством ($t_j = \frac{l_j}{v_j}$); c_k – общее количество эвакуируемых из вершины k типа 1 ($k \in I_1$); d_k – максимальное количество эвакуируемых в вершину k типа 3 ($k \in I_3$); $(A IS)_i$ – нагрузка i -ой дуги сети – общее количество эвакуируемых по дуге; $(IN Y)_i$ – интегральный поток по i -ой вершинам сети (сумма входящего и исходящего потоков);

Разработанная автором программная реализация системы управления процессом эвакуации, основанная на модели (7), апробирована и зарегистрирована во ВНИИЦ.

9. В работе отмечено, что в реальных условиях при формировании оптимального распределения транспортного ресурса возникает необходимость решения задачи (2) с учетом ограничений (5) при наличии неопределенных факторов, таких как, например, погодные условия или состояние транспортной сети, что

существенно увеличивает размерность задачи, а тем самым сложность ее решения. Данная задача представляет собой нелинейную задачу математического программирования. В работе представлен эффективный метод решения задач данного класса, основанный на аппроксимации нелинейных зависимостей скорости потока от его плотности полиномиальными функциями. Решение прямой задачи в этом случае аналогично по сложности решению сепарабельных задач нелинейного программирования. Показано, что если построить двойственную задачу (8), то все ее ограничения линейны, а максимизируемая функция вогнута:

$$\max_{\lambda, \mu, \alpha \in \Lambda_0} \left(\sum_{j \in \Gamma} \Phi_j(\mu_j, \alpha_j) - \sum_{i \in C} d_i \sum_{k=1}^l \lambda_i^k \right), \quad (8)$$

$$\lambda_{n_2(j)}^k - \lambda_{n_1(j)}^k - \mu_j^k \geq 0, \quad j \in \Gamma \setminus C(0),$$

$$\lambda_{n_2(j)}^k - \mu_j^k \geq 0, \quad j \in C(0),$$

$$\sum_{k=1}^l \mu_j^k \varphi_j'(0, k) + 1 + \alpha_j \leq 0, \quad j \in \Gamma,$$

$$\sum_{k=1}^l \mu_j^k \varphi_j'(X_0, k) + 1 + \alpha_j \geq 0, \quad j \in \Gamma,$$

$$\Phi_j(\mu_j, \alpha_j) = \min_{x_j} ((1 + \alpha_j)x_j + \sum_{k=1}^l \mu_j^k \varphi_j(x_j, k)),$$

где α, λ, μ - двойственные переменные, φ - нелинейные функции ограничений, d - объемы вывозов, x - объемы транспортных средств.

В работе также построен эффективный алгоритм решения двойственной задачи (8) и синтеза из решения двойственной задачи решения прямой задачи. Построенный алгоритм позволяет свести решение исходной задачи к решению последовательности задач линейного программирования, сформированных путем линеаризации целевой функции на каждой итерации.

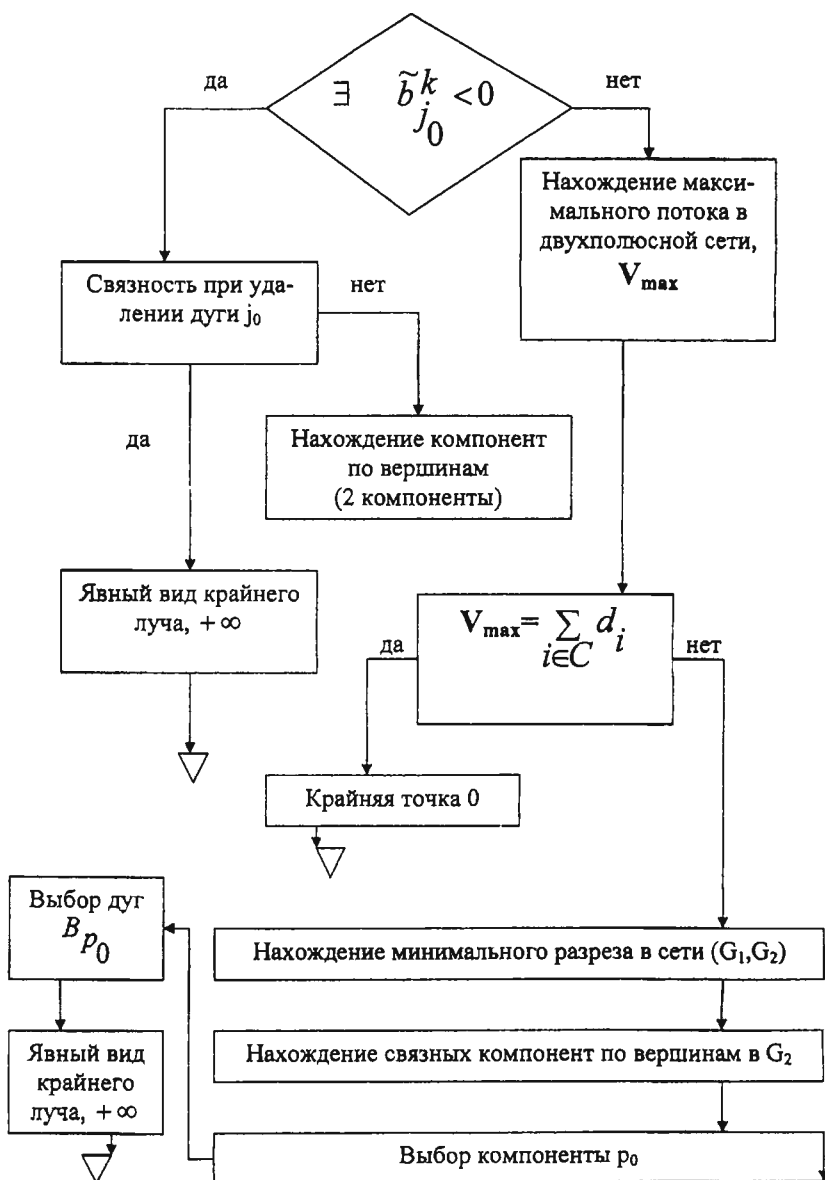


Рис. 4. Схема алгоритма синтеза коммуникационной сети на основе метода декомпозиции и алгоритмов максимального потока и покрывающего леса

10. Построен оригинальный алгоритм синтеза коммуникационных сетей при наличии неопределенных факторов на основе использования метода декомпозиции Данцига-Вулфа, алгоритмов нахождения максимального потока и минимального разреза, а также построения покрывающего леса (рис. 4). Использование семейства этих алгоритмов позволяет существенно увеличить допустимую размерность задач оптимального синтеза эвакуационных планов в условиях наличия неопределенных факторов.

В заключении работы обобщены представленные в ней результаты и вытекающие из них выводы.

В приложениях к диссертационной работе приведены описания программных продуктов, реализующие методы и модели, разработанные в диссертации, а также представлен пример, демонстрирующий функциональные возможности системы поддержки принятия решений управления процессами эвакуации крупных городов.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Хайрулин Р.С. Особенности развития рынка урана. Современные аспекты экономики. СПб. – 2008. – 0,4 п.л.
2. Система оценки временных параметров эвакуационных планов [Текст]: РТО: ООО «Интеллект-Система»; рук. Косоруков О. А.; исполн.: Косоруков О. А., Хайрулин Р. С. – М., 2009. – Инв. № ВНИИЦ 50201050022. – 0,81 п.л. (авторский вклад – 0,4 п.л.)
3. Хайрулин Р.С. Математические модели оптимизации эвакуационных планов. Двадцать третьи Международные Плехановские чтения (19-23 апреля 2010 г.): тезисы докладов аспирантов и магистрантов. - М.: ГОУ ВПО «РЭА имени Г.В. Плеханова», 2010. – 0,12 п.л.
4. Хайрулин Р.С. Разработка эффективных эвакуационных планов на основе оптимизационной математической модели. Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова, №4, 2010. – 0,25 п.л. (Издание входит в список ВАК).

5. Хайрулин Р.С., Косоруков О.А. Модель поддержки принятия решений при проведении эвакуации из крупных городов. Вестник Тамбовского Университета, Тамбов, № 8 (88), 2010. – 0,25 п.л. (авторский вклад – 0,12 п.л.). (Издание входит в список ВАК).
6. Хайрулин Р.С. Применение теории двойственности для решения задач разработки эвакуационных планов. Современные аспекты экономики. СПб. – № 6 (154) 2010. – 0,5 п.л.
7. Хайрулин Р.С., Косоруков О.А. Алгоритм оптимального синтеза эвакуационных планов на основе теории графов и методов декомпозиции. // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2010. - № 4. - <http://ipb.mos.ru/ttb>. - 0,75 п.л. (авторский вклад – 0,37 п.л.). (Издание входит в список ВАК).
8. Хайрулин Р.С. Моделирование эвакуационных процессов на основе оптимизационно – имитационной математической модели. Международная научно-практическая конференция «Современная экономика: концепции и модели инновационного развития». Тезисы докладов. М.: Изд. Рос. экон. акад., - 2010. – 0,31 п.л.

Напечатано в типографии
ГОО ВПО «РЭА имени Г. В. Плеханова».
Тираж 100 экз. Заказ № 82

162